



CONGRESO
CONSULTORES DE ESTRUCTURAS
Barcelona, 3-5 de abril de 2019

COMUNICACIÓN 33

CÓDIGO ESTRUCTURAL: NORMATIVA

Eurocódigo GT 5: estructuras de membrana

J. I. de Llorens

**Josep Ignasi de Llorens Duran**

Dr. Arquitecto

Escuela de Arquitectura de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya

Profesor emérito

e-mail: ignasi.llorens@upc.eduweb: <https://www.wgat.webs.upc.edu/portada.html>**RESUMEN**

El comité técnico CEN/TC 250 "Eurocódigos estructurales" de la Unión Europea ha aprobado el documento previo a la redacción del Eurocódigo "Estructuras de membrana" y convocado la redacción del borrador del mismo. En esta ponencia se presentan comentados algunos de sus aspectos más relevantes.

PALABRAS CLAVE: cubiertas textiles, membranas estructurales, estructuras atirantadas, ETFE, normativa.

1. Antecedentes

La Asociación Europea de Estructuras Tensadas "TensiNet" (<http://www.tensinet.com>) publicó en 2004 la "Guía europea de diseño de las estructuras superficiales tensadas", traducida al castellano en 2009 con la colaboración de Juan Monjo y José Llorens. En 2007 se constituyó en el seno de "TensiNet" un grupo de trabajo para la redacción de la normativa que propuso a la Unión Europea en 2008 la redacción del Eurocódigo 12: "Tensile Surface Structures" basado en la guía mencionada. La propuesta fue aceptada en la reunión de la comisión de normativa de los eurocódigos CEN/TC250 del 01/07/2009 y en 2010 se constituyó el grupo de trabajo "WG5 Membrane Structures". El comité técnico español de normalización "AEN/CTN 140 Eurocódigos estructurales" reunido el 10/11/2010 acordó la creación del grupo espejo "GT-5 Estructuras de membrana" basado en la comisión de normativa de "TensiNet Ibérica" y ampliado con otros miembros expertos que manifestaron su interés.

2 Contenido

El documento incluye la presentación de los aspectos a considerar en el diseño de las estructuras de membrana, el estado del arte, la normativa y las recomendaciones existentes así como las reglas de diseño que deberían formar parte del Eurocódigo. Se estructura en 11 capítulos y 6 anexos.

3 Introducción

La introducción incluye la justificación de la necesidad del Eurocódigo de estructuras de membrana, las especificaciones de los Eurocódigos vigentes aplicables a las estructuras de membrana y las normas y recomendaciones nacionales existentes en Alemania, Holanda, Francia, Bélgica y España. También presenta las características generales de este tipo de estructuras, que son: forma, superficie, pretensado, deformabilidad y fabricación. Para ilustrar de qué estructuras trata el documento, la portada incluye 6 ejemplos notables: el estadio olímpico de Kiew (fig.01), la casa de té del museo de artes aplicadas de Frankfurt (fig.02), la estación de autobuses de Aarau (fig.03), la estación de ferrocarril de Salzburgo (fig.04), el centro comercial Rheingalerie de Ludwigshafen (fig.05) y la terminal 5 del aeropuerto de Heathrow (fig.06).



Figura 01: Estadio Olímpico de Kiev, Ucrania. gmp Arquitectos, Hamburgo, con form TL, Radolfzell, 2011



Figura 02: Casa de Té, Frankfurt. Kengo Kuma con Canobbio y form TL, 2007.



Figura 03: Estación de autobuses de Aarau. Vehovar & Jauslin, Arquitectos con form TL, 2014.

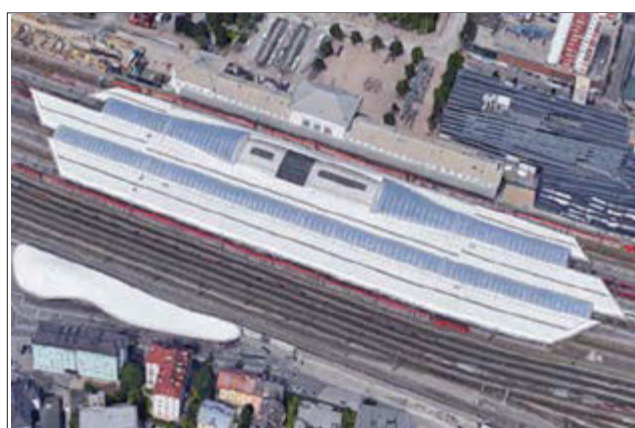


Figura 04: Estación de Salzburgo. Kada Wittfeld, Arquitecto con Ceno Membrane Technology GmbH, 2013.



Figura 05: Centro comercial, Ludwigshafen. ECE Projectmanagement GmbH con Ceno Membrane Technology GmbH, 2010.

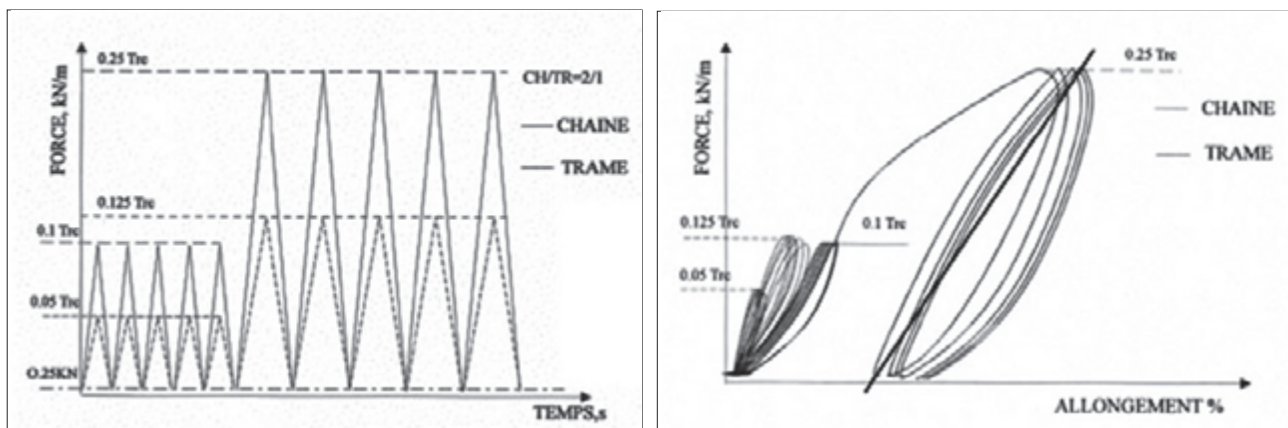


Figura 06: Terminal 5 del Aeropuerto de Heathrow, Londres. HOK International Ltd con Vector Foiltec, Bremen, 2008.



4 Los materiales

Los materiales que contempla el documento son los tejidos: PES/PVC; fibra de vidrio/PTFE; fibra de vidrio/silicona, el PTFE y las láminas (o películas) de ETFE. Para el resto de materiales que se usan en este tipo de estructuras el documento remite a los Eurocódigos existentes. Los materiales que no están contemplados ni en el documento ni en los Eurocódigos requieren caracterización mediante ensayos. Este capítulo acaba refiriéndose a las propiedades estructurales, o sea: resistencia a la tracción, al desgarro y el corte, deformabilidad (figs.07 y 08), fluencia y adherencia.



Representación del ensayo de tracción biaxial. Figura 07 (izquierda): Cargas aplicadas. Figura 08 (derecha): Diagramas tensión (ordenadas en kN/m) / deformación (abscisas en %). La línea superpuesta al segundo ciclo de carga-descarga es la secante que se utiliza para determinar el módulo de elasticidad de acuerdo con las recomendaciones francesas.

5 Bases de proyecto

Las bases de proyecto concretan las consecuencias que, para el diseño, se derivan de las características de las estructuras de membrana mencionadas en la introducción. Son (fig.09):

- 1º) La necesidad de encontrar una forma doblemente curvada (para que sea estable), pretensada, en equilibrio y sometida a tracción.
- 2º) El cálculo estructural ha de contemplar las deformaciones porque son significativas, teniendo en cuenta además que las cargas de viento y de nieve no son las que se aplican a los edificios rígidos porque las deformaciones las alteran considerablemente.
- 3º) El patroneado o descomposición de la superficie en facetas planas para poderla confeccionar a partir de los rollos del material que se haya escogido.

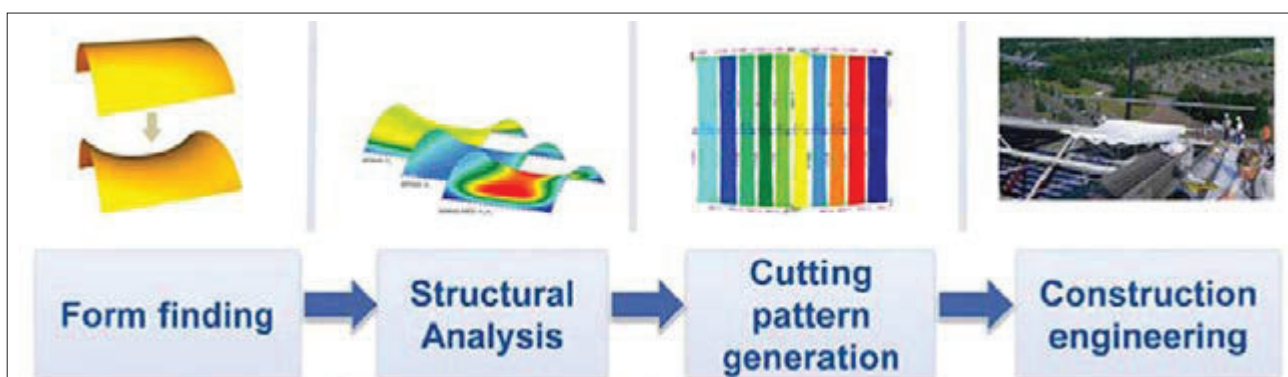


Figura 09: Bases de proyecto



4º) El proyecto y análisis de la construcción incluyendo el procedimiento y las fases de pretensado.

6 Durabilidad.

Los principales agentes que alteran la durabilidad de las membranas son: el recubrimiento, la humedad, la radiación UV, la agresividad química del ambiente, las tensiones y la temperatura. Estos agentes resultan más agresivos cuando actúan combinados (fig.10).

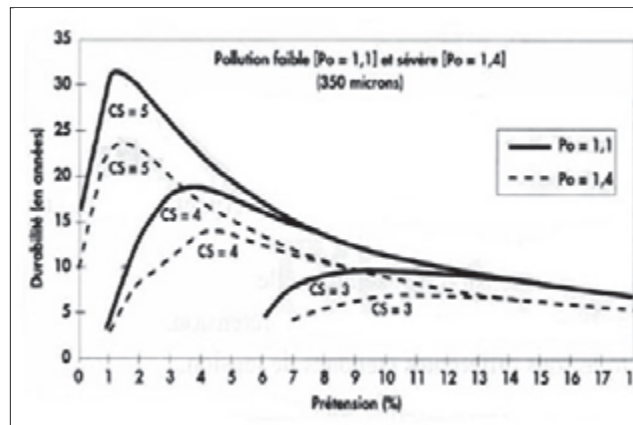


Figura 10: Relación entre durabilidad del tejido de poliéster revestido con PVC en años (ordenadas) y el nivel de pretensado referido a la rotura (abscisas). Po=1,1 indica nivel de contaminación bajo y Po=1,4 nivel de contaminación elevado. CS es el coeficiente de seguridad a la rotura. Obsérvese que los niveles elevados de pretensado afectan mucho a la durabilidad así como el pretensado inferior al 1%. Además, las curvas correspondientes a cada nivel de contaminación convergen.

7 Bases de cálculo.

El punto de partida del análisis estructural es la forma inicial obtenida a partir de las condiciones de borde y del pretensado. Para obtenerla se pueden utilizar maquetas o métodos numéricos tales como el de la densidad de fuerzas o de relajación dinámica. El modelo de análisis tiene que representar el comportamiento de la membrana relativo a los esfuerzos y las deformaciones. Tiene que incluir los elemento estructurales de soporte de la membrana en los casos en los que sus deformaciones alteren significativamente los resultados.



Figura 11: Ch.García-Diego, J.Llorens & H.Pöppinghaus, 2007: Cubierta del acuario de Almuñécar (TensiNews, nº 13, p.9).

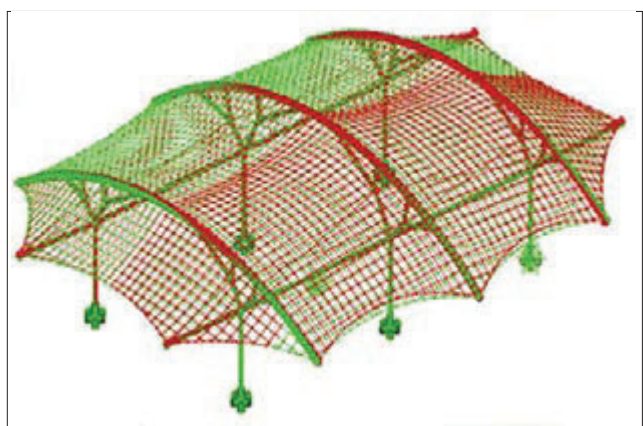


Figura 12: Análisis conjunto de la membrana con la estructura de soporte. Software Easy de Technet GmbH, Berlin, Stuttgart.



En el proyecto de la cubierta del acuario de Almuñécar, por ejemplo, el análisis conjunto de la membrana y la estructura de soporte permitió reducir un 30% la cantidad de acero, porque las deformaciones de la membrana disminuyen las cargas transmitidas (figs.11 y 12).

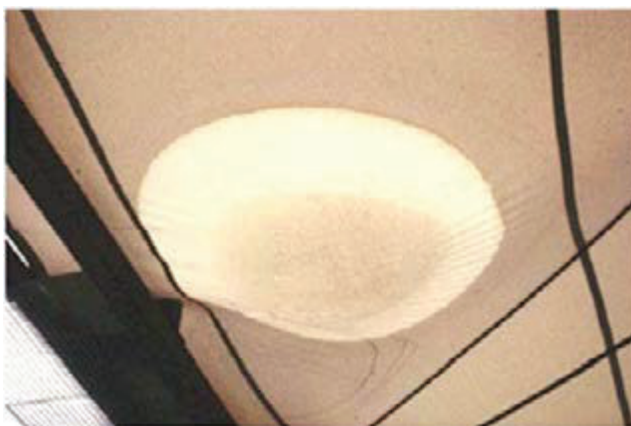
Este capítulo contempla también las estructuras presostáticas y, en particular, los cojines y las vigas (de ETFE y Tensairity, respectivamente).

8 Estados límite últimos.

Los estados límite últimos considerados son el de rotura y el de deformación excesiva. Hay que verificar que las tensiones movilizadas en cualquier punto de la membrana, juntas y conexiones son inferiores a la resistencia admisible, resultado de aplicar a la resistencia a la rotura los coeficientes de seguridad relativos al impacto de los factores siguientes: ambiente (contaminación, rayos UV, etc.), tensión biaxial, duración de la carga, temperatura y tamaño. Se hace una mención especial de los cojines de ETFE y de los refuerzos.

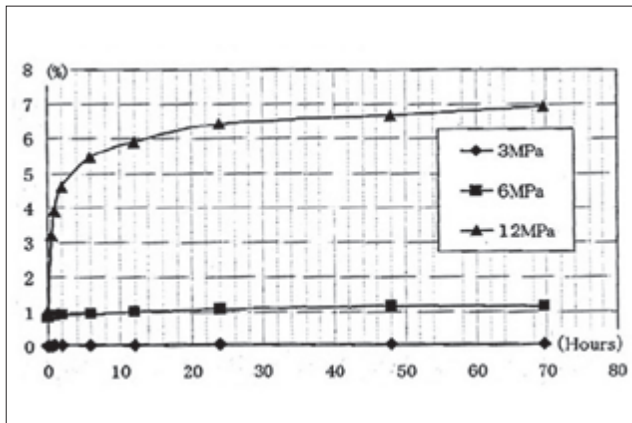
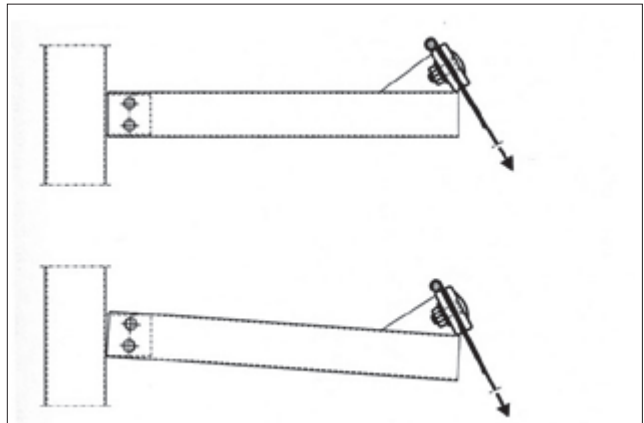
9 Estados límite de servicio.

Los estados límite de servicio considerados son: las deformaciones máximas (para evitar la inversión de la curvatura, la formación de charcos o acumulaciones de nieve y el contacto de la membrana con los elementos fijos estructurales o auxiliares, (figs.13 y 14), las vibraciones debidas al viento (flameo), las arrugas (zonas sin tensión), el pretensado mínimo y el rasgado.



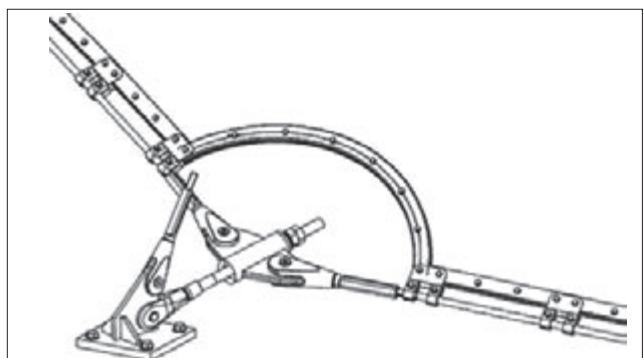
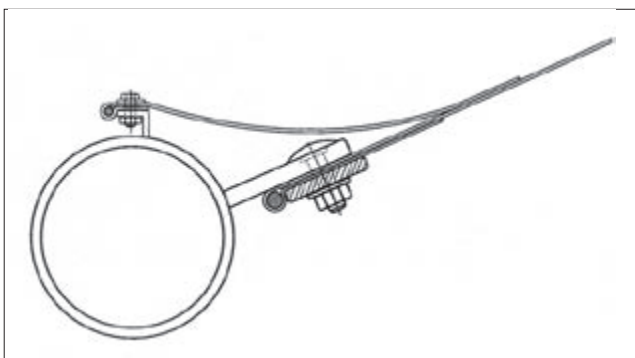
Figuras 13 y 14: Los encharcamientos progresivos invierten la curvatura.

El documento distingue entre los estados límite de servicio reversibles (deformación debida al viento) e irreversibles tales como la fluencia o las pérdidas de pretensado. Como puede verse en la figura 15, el pretensado influye en la fluencia. Obsérvese que 3 N/mm² no influyen, 6 N/mm² se estabilizan al 1% al cabo de 50 horas y 12 N/mm² al cabo de 70 horas han producido una fluencia no estabilizada del 7%. La figura 16 muestra como la deformación permanente de la estructura primaria aumenta la deformación de la membrana. Para los estados límite de servicio se desactivan todos los coeficientes de seguridad y se recomienda que la estructura primaria sea redundante, es decir, que permanezca estable en el caso de rotura o de gran deformación (figs. 17 y 18).

**Figura 15: El pretensado influye en la fluencia****Figura 16: Deformación permanente de la estructura primaria.****Figuras 17 y 18: El viento ha desgarrado la membrana pero los mástiles siguen en pie.**

10 Detalles constructivos

El documento considera que los detalles constructivos no son un aspecto secundario del proyecto. Por ello les dedica este extenso capítulo que establece la tipología siguiente: uniones y juntas, bordes flexibles o rígidos, puños o esquinas, crestas y valles, puntos altos y bajos, refuerzos, placas base de mástiles y tirantes, anclajes y cimentaciones (figs. 19 y 20). Además incluye los aspectos a considerar en su diseño, que son: coherencia y proporcionalidad, resistencia, protección de la membrana, flexibilidad, compatibilidad de deformaciones, puesta en obra, redundancia, estabilidad, seguridad, aspecto, ajustabilidad para el re-tensado, impermeabilidad, resistencia al fuego, durabilidad, mantenimiento y accesibilidad.

**Figuras 19 y 20: Borde rígido empresillado (requiere pendiente para que el faldón no se encharque) y esquina abierta.**



11 Ejecución.

Se considera que forman parte de la ejecución: el patroneado, los planos de taller, el suministro de la membrana, su confección, control, embalado, transporte y montaje (figs.21 a 25). Son aspectos muy relevantes del montaje de las estructuras de membrana el tamaño y el peso de las diferentes partes, el equipo necesario para la elevación y el transporte, la accesibilidad, el equipo humano, el plazo, la seguridad y las condiciones climatológicas. La forma y el pretensado resultantes del proceso de ejecución determinan, no solamente el comportamiento, sino que también influyen en la resistencia y estabilidad.



Figura 21: Soldadura de la membrana



Figura 22: Etiquetado de cables y accesorios en taller



Figuras 23 a 25: Montaje (M.Seidel, 2009)

El coste del montaje es significativo. Puede representar el 30% del presupuesto de ejecución material de las cimentaciones, la estructura, la membrana y los accesorios, por lo que se debe plantear una solución que no lo desequilibre. También se debe considerar que, después de la primera instalación, habrá que controlar las tensiones y restituirlas, así como realizar operaciones de mantenimiento en función de los materiales empleados y de la agresividad del ambiente.

12 Observaciones

El desarrollo actual de las estructuras de membrana se basa en sus posibilidades formales, eficiencia, ligereza, flexibilidad y sostenibilidad. Admiten grandes luces y se aplican no solamente a las cubiertas para impermeabilizar el edificio, sino también a la totalidad de la envolvente exterior para conseguir un aspecto determinado (fig.26), mejorar su comportamiento térmico controlando la radiación solar o captando su energía (fig.27). En este documento se proporcionan las bases para la redacción del Eurocódigo “Estructuras de membrana”. Se completará con las normas de ensayo del material que está elaborando el grupo CEN/TC 248/WG 4.



Figura 26: M.Fuksas con Canobbio, 2008: el auditori de Estrasburgo está envuelta en una fachada textil que lo protege.



Figura 27: La cubierta del aparcamiento de los camiones del servicio de recogida de basuras de Munich incorpora células fotovoltaicas.

13 Referencias

Este capítulo incluye las 168 referencias en las que se basa el documento, que son de gran interés para los que estén interesados en profundizar.

14 Anexos

Anexo A: 52 Proyectos realizados en Europa.

Este anexo presenta algunos proyectos europeos de referencia. Se trata de unos ejemplos que ilustran el ámbito de aplicación del documento. Varían de 95 m² a 80.000 m². Los usos abarcan entre otros: patios, escuelas, centros comerciales, calles, villas, mezquitas, hangares, polideportivos, estados, pabellones de exposición, claustros, piscinas, fachadas, universidades, ruinas, excavaciones arqueológicas, almacenes, estaciones, hospitales, oficinas, paradas de autobús, centros de conferencias, esculturas, museos y jardines botánicos. Aparte de las cubiertas, que han sido la aplicación más utilizada, destacan recientemente las aplicaciones destinadas a mejorar el balance energético protegiendo al edificio de la radiación solar y el viento o captando energía.

Anexo B: Métodos de ensayo de materiales.

Anexo C: Coeficiente de minoración de la resistencia de las membranas.

Anexo D: Modelado de la rigidez.

Anexo E: Mayoración de las acciones.

Anexo F: Cálculo de vigas presostáticas.

El documento está disponible en internet en la dirección:

<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/prospect-european-guidance-structural-design-tensile-membrane-structures-support> (visitada el 12/01/2019)